



AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE PRISMAS DE BLOCOS MAÇICOS DE CONCRETO PARA A ALVENARIA ESTRUTURAL

Jovynttino Francisco de Araújo Santana

Tereza Denyse Pereira de Araújo

jovyuna@hotmail.com

denyse@ufc.com.br

Universidade Federal do Ceará

Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil

Campus do Pici, Bloco 710, 60455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil

Resumo. Com a expansão da engenharia de estruturas e dos diferentes sistemas construtivos que estão surgindo a cada dia na indústria da construção civil, o engenheiro estrutural necessita incorporar a análise numérica como uma ferramenta de trabalho usual. O presente trabalho busca avaliar numericamente o comportamento de prismas de blocos maciços de concreto considerando o comportamento não linear dos materiais quando sujeitos à compressão simples. Pretende-se contribuir com informações mais primorosas para elementos de alvenaria estrutural, sobre o comportamento do prisma como um todo e também da influência de seus componentes. A modelagem é feita utilizando a ferramenta computacional de Elementos Finitos ABAQUS, cujos resultados são comparados com resultados experimentais e outros valores numéricos encontrados na literatura, bem como com valores de projeto obtidos pela norma europeia. Ao final, pode ser observado que o modelo numérico se aproximou bastante do modelo experimental e, de certa forma, divergiu do modelo analítico, o que justifica a forma de trabalhar a favor da segurança das formulações já existentes e que são frequentemente utilizadas em projetos de alvenaria estrutural. Com isso pode-se concluir que o modelo numérico gerado foi capaz de representar tanto as propriedades mecânicas quanto os mecanismos de ruptura da estrutura analisada.

Palavras-chaves: Alvenaria Estrutural, Elementos Finitos, Concreto e Compressão Simples.

1 INTRODUÇÃO

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo cujos elementos que desempenham a função estrutural são os mesmos que fazem a vedação da estrutura (bloco e argamassa), o que traz maior racionalização para esse tipo de processo construtivo, tornando-se uma alternativa mais econômica e de fácil aplicação dos materiais. Além disso, reduz os prazos de execução quando se compara com outras técnicas construtivas existentes no mercado.

Com isso, esse sistema construtivo vem ganhando bastante espaço no mercado da construção civil. Entretanto, deve-se considerar que os conhecimentos sobre o comportamento da alvenaria estrutural ainda necessitam ser bastante estudados para que se alcancem patamares de desenvolvimento tecnológico similares aos que podem ser vistos sobre outras estruturas convencionais mais utilizadas.

Até 2011, o cálculo dessas estruturas com blocos de concreto era feito pelo Método das Tensões Admissíveis, considerado um método antiquado por muitos profissionais. Esse método era regulamentado pela NBR 10837:1989 - Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto, que foi substituída pela NBR 15961:2011 - Alvenaria estrutural - blocos de concreto, dividida em duas partes. A primeira dedicada ao projeto de alvenaria com blocos de concreto e a segunda, a execução e controle. O projeto, agora, deve ser feito usando o Método dos Estados Limites, que é uma abordagem mais realística e a favor da segurança (Niero Jr, 2014).

Segundo Izquierdo (2015), os avanços mais atuais introduzidos nas normas de projeto de alvenaria estrutural ainda estabelecem alguns coeficientes de segurança considerados bastantes conservadores. Para esse autor, um maior conhecimento sobre o comportamento dos materiais faz com que coeficientes de segurança e alguns parâmetros e/ou recomendações de projeto possam assim ser minimizados/otimizados.

A previsão exata da resistência à compressão da alvenaria é importante tanto para a fase de projeto como para a de execução. Esta resistência é muitas vezes obtida por ensaios individuais de cada componente (bloco e argamassa) da alvenaria e de prismas de alvenaria sujeitos à compressão axial. Os ensaios destes prismas é o que melhor permite conhecer o comportamento desses materiais trabalhando juntos. Nesse caso, acredita-se que o comportamento de uma parede é semelhante ao do prisma (Mata, 2006).

Uma das ferramentas que vem sendo muito utilizada entre os pesquisadores é a simulação numérica destes prismas de alvenaria submetidos à compressão. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um dos mais utilizados, pois é capaz de transformar um sistema estrutural contínuo em um sistema estrutural discreto, por meio da divisão de seus componentes em pequenas regiões, com um número finito de graus de liberdade, obtendo-se bons resultados no que diz respeito ao comportamento real da estrutura.

Há duas abordagens para se modelar estruturas de alvenaria no MEF: a modelagem homogênea e a heterogênea. A homogênea, também conhecida como macro-modelagem, o bloco e a argamassa são transformados em um material compósito uniforme. A principal desvantagem desse método é a necessidade de uma malha bem refinada para análises em grandes escalas, além da dificuldade em considerar alguns aspectos da alvenaria, tais como

anisotropia na região inelástica e o comportamento pós-pico de amolecimento tanto na tração quanto na compressão (Bertolesi et al., 2016).

Já na modelagem heterogênea, também conhecida como micro-modelagem, o bloco e a argamassa são considerados separadamente numa aproximação heterogênea. Essa modelagem permite usar modelos não lineares na representação do comportamento de cada material, além de possibilitar modelar a região de interface entre os dois materiais. Essa região de interface é considerada como um plano potencial de fissuras. Segundo Bolhassani et al. (2015), os modelos heterogêneos são mais representativos do que os homogêneos, apesar destes últimos serem os mais utilizados.

A modelagem heterogênea pode ser bi ou tridimensional. Dentre os muitos trabalhos encontrados na literatura pode-se citar Riddington e Naom (1994), que utilizaram um modelo bidimensional simplificado, onde a interação entre argamassa e bloco foi considerada por uma série de elementos de alta rigidez, chamados *links*, ligando nó de argamassa com nó de blocos. Gomes (2001), utilizando o software de elementos finitos DIANA, simulou o ensaio de compressão de prismas de alvenaria utilizando um modelo de fissuração distribuída para a tração, o critério de plastificação de Drucker-Prager com endurecimento isotrópico e o critério de atrito de Coulomb para representar o comportamento não linear das interfaces entre bloco e argamassa.

Drougkas et al. (2015) simularam prismas de alvenaria usando um modelo misto de plasticidade dependente da pressão em compressão e um modelo de trincas contínuas (*smeared crack model*) em tração. Estes modelos foram organicamente combinados em um modelo não linear de deformação total com descarregamento secante, cujo intuito era prever a resistência à compressão da alvenaria, bem como seu módulo de elasticidade.

Sendo assim, o presente trabalho busca através de simulação numérica por elementos finitos avaliar o modelo experimental de prisma de alvenaria estudado por McNary e Abrams (1985), por meio da utilização da ferramenta computacional ABAQUS/CAE. O principal objetivo é validar o modelo numérico para futuras análises de prismas ensaiados por Oliveira (2016). Os resultados obtidos são comparados com valores experimentais e numéricos encontrados na literatura e, também, pelas formulações recomendadas pelo EUROCODE EN 1996-1-1 (1999).

A estratégia é usar a micro-modelagem do prisma de alvenaria, onde o bloco e a argamassa são discretizados por elementos contínuos. Com isso o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e, principalmente, as propriedades não lineares de cada um dos elementos da alvenaria são levadas em consideração.

O comportamento não linear do concreto e da argamassa é representado pelo Modelo de Dano Plástico (*Concrete Damage Plasticity – CDP*), tanto na compressão quanto na tração. Nesse modelo, os danos de compressão e tração podem ser observados separadamente, além de possibilitar verificar os modos de falha por fissuração ou esmagamento na compressão.

2 COMPONENTES DA ALVENARIA ESTRUTURAL

Na alvenaria estrutural, as paredes são os elementos portantes compostos por unidades de alvenaria (blocos de concreto), unidas por juntas de argamassas, capazes de resistirem a outras cargas além do seu próprio peso (Prudêncio Jr, 1986). Seu comportamento é bastante

complexo, devido, principalmente, a essa associação. Trabalha à compressão, devido às cargas verticais, e ao cisalhamento e à flexão, devido às cargas horizontais (vento, por exemplo).

O bloco é o principal componente da parede de alvenaria e também o mais resistente. É denominado como unidade da alvenaria, cujas propriedades mecânicas mais importantes para sua caracterização são: a resistência à compressão, a resistência à tração, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. A resistência à compressão do bloco é o parâmetro mais importante para definir a resistência da alvenaria. Contudo, a resistência da parede de alvenaria é geralmente inferior à do bloco, devido à presença da junta de argamassa (Santos et al., 2017).

Já a argamassa de assentamento é o elemento responsável pela ligação entre os blocos, garantindo a transmissão de tensões entre as unidades, bem como sua uniformização. Além disso, permite a absorção de pequenas deformações impostas às paredes. É por meio dela que se garante o efeito monolítico da parede, influenciando o comportamento da alvenaria através de suas propriedades mecânicas (Santos et al., 2017). Argamassas muito resistentes podem aumentar consideravelmente o potencial de fissuração da alvenaria, prejudicando assim o comportamento do conjunto. Oliveira (2016), recomenda o valor máximo de 20 MPa, para a resistência à compressão da argamassa.

2.1 Comportamento da alvenaria

Os prismas (Fig. 1) são corpos-de-prova constituídos de dois ou mais blocos ligados entre si por juntas de argamassa, horizontais e verticais, grauteados ou não. Seu comportamento mecânico no ensaio de compressão axial é semelhante ao da alvenaria.

Portanto, quando a carga vertical de compressão é aplicada no prisma, a argamassa de assentamento tende a se expandir lateralmente, mas o atrito na interface bloco/argamassa restringe esta deformação. Devido a isto, surgem tensões de compressão lateral na argamassa e, para que seja mantido o equilíbrio do conjunto, surgem tensões de tração no bloco. Ambos, bloco e argamassa, estão em um estado triaxial de tensões (Fig. 1).

Assim, pode-se dizer que a alvenaria pode falhar por três maneiras distintas: por tração no bloco; pelo esmagamento do bloco devido à compressão; e, por fim, pelo esmagamento da argamassa, também devido à compressão (Cheema e Klingner, 1986).

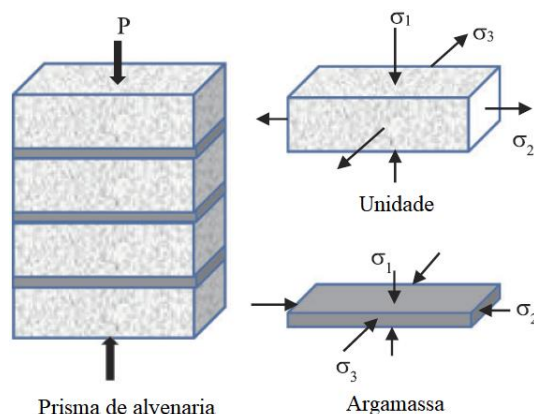


Figura 1. Prisma de alvenaria e estados de tensão para cada componente (Fonte: Zahra e Dhanasekar, 2016)

3 MODELO CONSTITUTIVO

Os materiais constituintes do bloco e da argamassa são considerados quase frágeis, cuja curva tensão-deformação é parabólica na compressão. Ou seja, essa curva apresenta um trecho elástico bem pequeno, seguido por um trecho inelástico até alcançar uma tensão de pico e um trecho descendente pós-pico (Fig. 2a). Já na tração, a curva apresenta um trecho elástico até alcançar um valor de pico; após esse pico, a curva é descendente (Fig. 2b). Assim, esses comportamentos são muito difíceis de serem capturados com modelos de dano elástico ou critérios elastoplásticos.

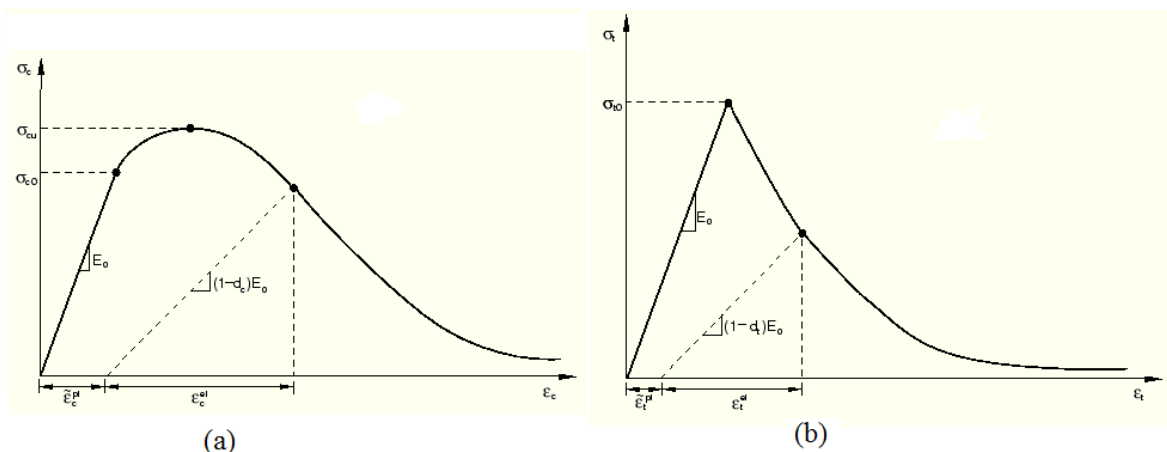


Figura 2. Curva tensão-deformação dos materiais na compressão (a) e na tração (b) (Simulia, 2012)

O Modelo de Dano Plástico (CDP) foi proposto por Lubliner et al. (1989) e está disponível no software ABAQUS/CAE. Esse modelo busca descrever o comportamento não linear de materiais quase frágeis, como o concreto. É baseado na Teoria da Plasticidade e na Mecânica do Dano, incorporando assim os conceitos de dano em um modelo plástico.

Este modelo no ABAQUS é considerado como o modelo de Drucker-Prager modificado (Kmieciak e Kaminski, 2011). No critério de Drucker-Prager, a superfície de escoamento de um material tem forma circular no plano desviador, enquanto que para o CDP é não circular e corresponde a combinação de três elipses (Fig. 3). Portanto, o que diferencia os dois modelos é o valor do parâmetro K_c , que representa a razão entre a distância do eixo hidrostático ao meridiano de tração e de compressão no plano desviador. O valor recomendado para este parâmetro no CDP é $2/3$.

O CDP considera dois mecanismos de falha do material, que são a formação de fissuras por tração e o esmagamento por compressão. Portanto, a rigidez do material é reduzida por dois parâmetros de dano independentes, um para cada mecanismo de falha. Essa perda de rigidez ocorre quando a tensão no material ultrapassar o trecho pós-pico (Fig. 2), ou seja, depois que as deformações plásticas estão presentes no material.

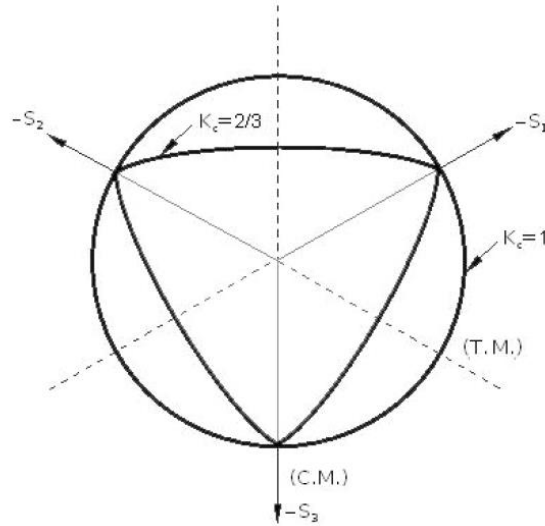


Figura 3. Superfície de ruptura na seção transversal desviadora (Fonte: Kmiecik e Kaminski, 2011)

Os dois parâmetros de dano, d_c (dano à compressão) e d_t (dano à tração), assumem valores de zero, indicando um material não danificado, até um (1), para o material totalmente danificado. Estes parâmetros são definidos pelas seguintes equações (Cardoso, 2014):

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{f_{cm}}, \quad (1)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_{tm}}, \quad (2)$$

em que, σ_c e σ_t são as tensões à compressão e à tração do material, respectivamente; f_{cm} e f_{tm} são as resistências médias à compressão e à tração do material, respectivamente. Se os parâmetros de dano não são especificados, o modelo comporta-se como um modelo de plasticidade.

3.1 Comportamento à Compressão

A curva tensão-deformação, utilizada neste trabalho para representar o comportamento à compressão do bloco de concreto e da argamassa, foi proposta por Guo (2014). Essa curva é composta por dois trechos, o que corresponde a fase elástica e o da fase inelástica. O trecho elástico é considerado até 30% de f_{cm} , que é obtido por:

$$\sigma_c = E_{cm} \cdot \varepsilon. \quad (3)$$

Em que, E_{cm} é o módulo de elasticidade inicial e ε é a deformação do material. O trecho inelástico é definido por:

$$\sigma_c = f_{cm} \cdot [\alpha_a \cdot x + (3 - 2 \cdot \alpha_a) \cdot x^2 + (\alpha_a - 2) \cdot x^3] \Rightarrow x \leq 1, \quad (4)$$

$$\sigma_c = \frac{f_{cm} \cdot x}{\alpha_d \cdot (x - 1)^2 + x} \Rightarrow x \geq 1. \quad (5)$$

Em que, x é a razão entre deformação, ε , e a deformação de compressão no ponto de pico, ε_{c1} , e é escrita como:

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1}}. \quad (6)$$

α_d (Eq. 5) é o parâmetro do trecho descendente e seu valor varia no intervalo fechado entre zero (plasticidade perfeita) até infinito (fragilidade total). α_a (Eq. 4) é o único parâmetro com significado físico. Seu valor varia no intervalo fechado entre 1,5 e 3 e representa a razão entre o módulo de elasticidade inicial (E_{cm}) e o módulo de elasticidade secante no ponto de pico (E_{c1}), ou seja,

$$\alpha_a = \frac{E_{cm}}{E_{c1}}. \quad (7)$$

No ABAQUS/CAE, o trecho elástico da curva tensão-deformação é subentendido quando se insere o módulo de elasticidade inicial do material. O trecho inelástico, contudo, deve ser fornecido através da parcela relativa à deformação inelástica. Essas deformações inelásticas (ε_{inel}^c) são definidas por:

$$\varepsilon_{inel}^c = \varepsilon - \frac{\sigma_c}{E_{cm}}. \quad (8)$$

3.2 Comportamento à Tração

O comportamento à tração do bloco de concreto e da argamassa também é definido pelas expressões empíricas propostas por Guo (2014). Assim, o trecho elástico é definido por:

$$\sigma_t = E_{cm} \cdot \varepsilon. \quad (9)$$

E o trecho inelástico é definido por:

$$\sigma_t = f_{tm} \cdot (1,2 \cdot x - 0,2 \cdot x^6) \Rightarrow x \leq 1, \quad (10)$$

$$\sigma_t = \frac{f_{tm} \cdot x}{\alpha_t \cdot (x-1)^{1,7} + x} \Rightarrow x \geq 1. \quad (11)$$

Sendo que o parâmetro α_t é expresso por:

$$\alpha_t = 0,312 \cdot f_{tm}^2. \quad (12)$$

x é a razão entre a deformação (ε) e a deformação de tração no ponto de pico (ε_{ct}) e é definida por:

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ct}}. \quad (13)$$

Da mesma forma que para o comportamento à compressão, deve-se fornecer os valores das deformações inelásticas do material na tração. As deformações inelásticas (ε_{inel}^t) são determinadas por:

$$\varepsilon_{inel}^t = \varepsilon - \frac{\sigma_t}{E_{cm}}. \quad (14)$$

3.3 Parâmetros Complementares do CDP

Outros parâmetros devem ser fornecidos no modelo CDP a fim de permitir a expansão das equações de comportamento dos materiais em estado axial para o estado multiaxial (Aguiar, 2015, citado por Santos et al., 2017). O primeiro parâmetro é a razão entre as tensões de escoamento no estado biaxial e uniaxial, cujo valor recomendado é 1,16 (Kmieciak e Kaminski, 2011). O ângulo de dilatação (ψ) é outro parâmetro, o qual é definido como o ângulo de inclinação entre a superfície de falha e o eixo hidrostático. Pode ser interpretado como um ângulo de atrito interno, cujo valor recomendado é $\psi = 36^\circ$.

Outro parâmetro é a excentricidade (ρ). A forma da superfície de escoamento é ajustada por esse parâmetro, pois no critério de Drucker-Prager, essa superfície possui a forma de uma reta ($\rho = 0$) no plano dos meridianos. Mas, como foi observado em ensaios experimentais, a superfície de escoamento assume a forma de uma hipérbole. Pode ser calculada como sendo a razão entre a tensão de tração pela de compressão (Kmieciak e Kaminski, 2011). O valor recomendado é $\rho = 0,1$.

O último parâmetro é a viscosidade (μ), que tem a função de facilitar o processo de convergência dos modelos numéricos, regularizando as equações constitutivas admitindo a viscoplasticidade dos materiais (Santos et al., 2017). Esse valor é ajustado conforme as análises, adotando-se para este trabalho o valor $\mu = 10^{-3}$.

4 ESTUDO DE CASO

O prisma de alvenaria em estudo faz parte de um conjunto de ensaios experimentais realizado por McNary e Abrams (1985), tendo já sido avaliado numericamente por alguns autores (Drougkas et al, 2015; Zucchini e Lourenço, 2007). Os referidos autores ensaiaram vários prismas, variando tanto o tipo de argamassa como o tipo de bloco.

O prisma (Fig. 4) escolhido é composto pela sobreposição de 5 blocos maciços de concreto cujas dimensões são 55 mm de altura, 194 mm de comprimento e 89 mm de largura. A ligação entre os blocos é feita por quatro filetes de argamassa (traço 1:2:9) com espessura de 7,5 mm, 194 mm de comprimento e 89 mm de largura. As propriedades mecânicas para o bloco e a argamassa são mostradas na Tabela 1. As curvas tensão-deformação para cada componente do bloco de concreto e da argamassa são mostradas na Fig. 5 e Fig. 6, respectivamente.

4.1 Modelo numérico

Como já foi dito, o prisma é modelado tridimensionalmente segundo a micro-modelagem, em que cada componente é representado por suas próprias propriedades mecânicas e dimensões. Apesar de demandar um grande esforço computacional, os resultados são mais

precisos, pois não são feitas suposições geométricas e efeitos e tensões fora do plano são consideradas tanto a nível global como local (Drougkas et al., 2015).

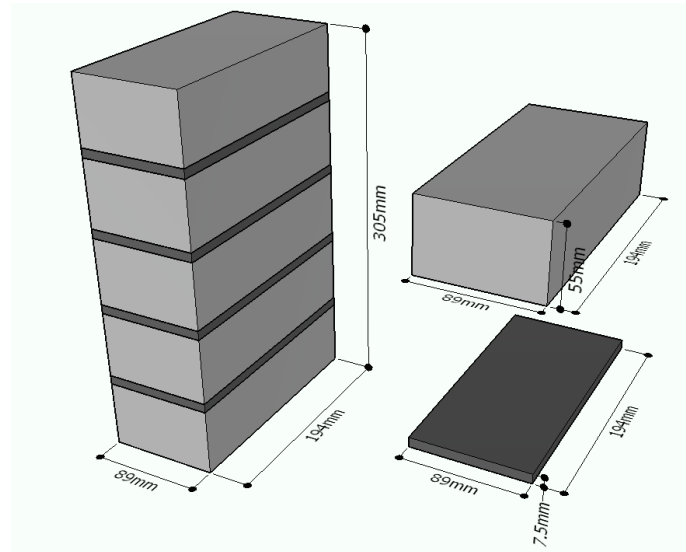


Figura 4. Modelo geométrico de prisma, com as dimensões do bloco e da argamassa

Tabela 1. Propriedades mecânicas do bloco de concreto e da argamassa (traço 1:2:9)

	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)
Bloco de concreto	1750	0,16	6,20	0,62
Argamassa (1:2:9)	9900	0,17	44,0	1,79

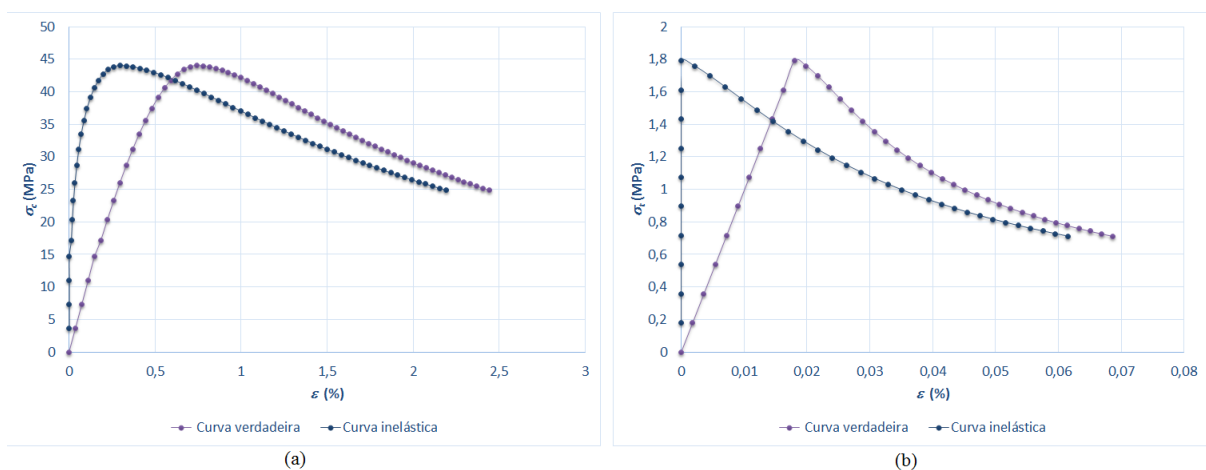


Figura 5. Curvas tensão-deformação do bloco de concreto à compressão (a) e à tração (b)

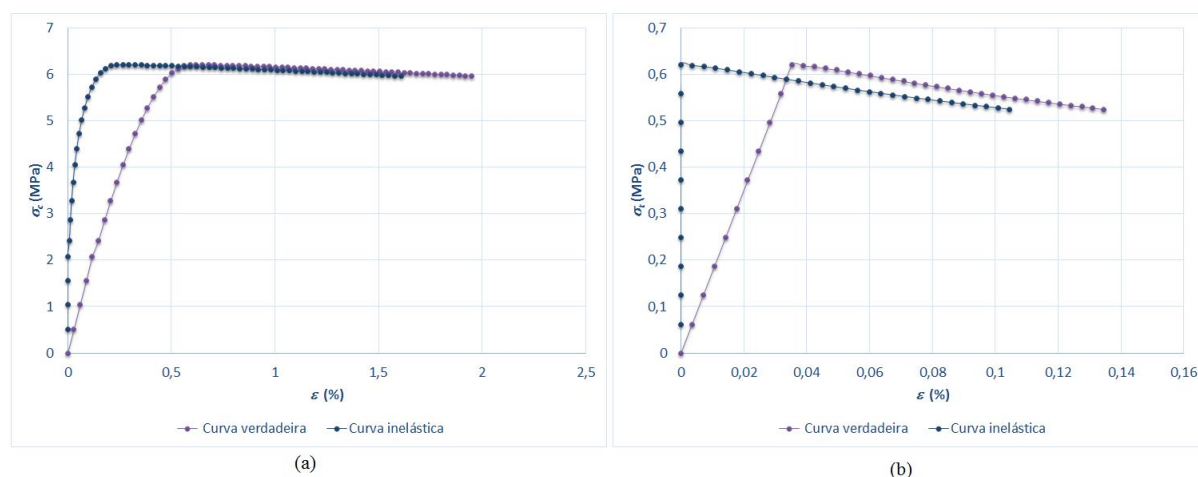


Figura 6. Curvas tensão-deformação da argamassa à compressão (a) e à tração (b)

Os blocos e as argamassas são discretizados com o elemento finito C3D8R, que é um elemento tridimensional sólido de 8 nós e 3 graus de liberdade translacionais por nó. Além disso, a formulação do modelo matemático é baseada em interpolação linear e integração reduzida. A escolha desse elemento deve-se a recomendações do próprio manual do ABAQUS (Simulia, 2012), que os indica para representar de forma mais adequada os problemas de contato entre elementos distintos.

Os elementos da malha do bloco têm 6,0 mm de lado e os elementos da argamassa têm 4,0 mm, totalizando assim 4320 elementos para o primeiro e 2156 elementos para o segundo, respectivamente. Na Fig. 7 pode-se observar o aspecto geral das malhas dispostos nos elementos constituintes do prisma de alvenaria.

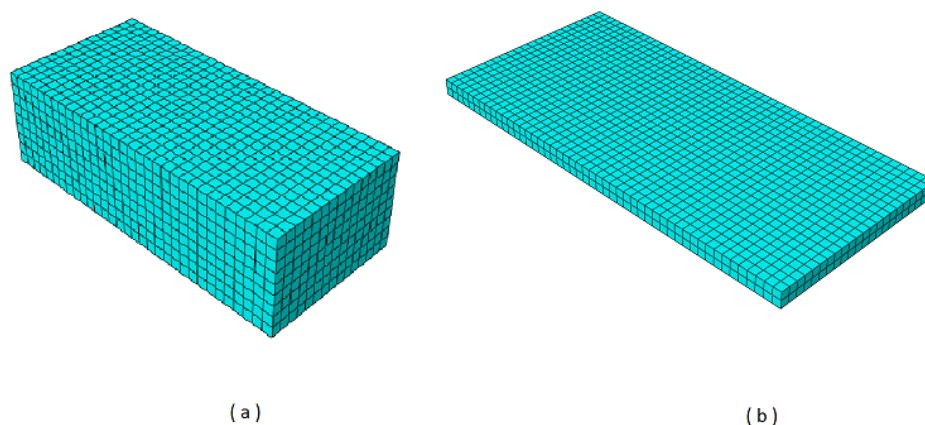


Figura 7. Aspecto das malhas para o bloco (a) e para a argamassa (b)

A ligação entre o bloco e a argamassa não é modelada, ou seja, não são considerados quaisquer parâmetros físicos para representar esse contato. Nesse caso, usa-se a opção *Constraint – Tie*, que permite uma adesão perfeita entre os dois materiais através da definição de superfícies *master* (mestre) e *slave* (escravo), não podendo haver deslocamentos relativos nestas superfícies.

A fim de modelar o mais fiel possível o ensaio do prisma de alvenaria, foram adicionadas duas placas rígidas dispostas na superfície superior e inferior do prisma (Fig. 8a). É nessas placas que as condições de deslocamento ou carga e as características de restrições são aplicadas, respectivamente. O prisma é considerado engastado na base (Fig. 8b) e é aplicada uma carga de deslocamento na superfície superior com valor de 1 cm.

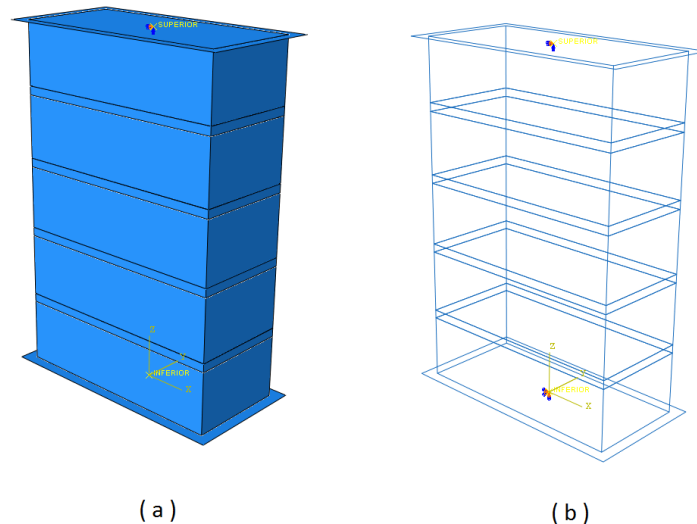


Figura 8. (a) Disposição das placas rígidas inferior e superior no prisma e (b) Condições de restrição consideradas à estrutura

O método de convergência utilizado na análise é o Riks modificado. Esse método é usado, em geral, quando se deseja obter soluções de problemas estáticos não lineares. Permite prever instabilidade e colapso geometricamente não linear, podendo incluir materiais não lineares e condições de contorno. Esse método soluciona os problemas de forma simultânea para cargas e deslocamentos, partindo de uma intensidade de carga que não é conhecida e de uma certa quantidade prévia de deslocamento aplicado. Sendo assim, para medir o progresso da solução, o método do comprimento de arco é utilizado ao longo do caminho de equilíbrio estático no espaço de deslocamento da carga, e assim esta abordagem é capaz de obter soluções independente da resposta ser estável ou instável (Simulia, 2012).

5 RESULTADOS

Para a obtenção dos resultados no modelo numérico, observa-se o comportamento do prisma com relação a sua degradação e perda de rigidez. Para isso, foi necessário observar em qual incremento de cálculo o valor do dano, à compressão e/ou à tração, está mais próximo da unidade, ou quando seu valor não mais varia com o aumento do número de incrementos analisados. Nesse caso, verificou-se que esse comportamento ocorreu devido à tração e foi identificado no incremento 64 na análise, para 100 incrementos (Fig. 9). Neste ponto, pode-se observar claramente que o colapso da estrutura se dará pelos esforços de tração no bloco ocasionados pelo esmagamento da argamassa.

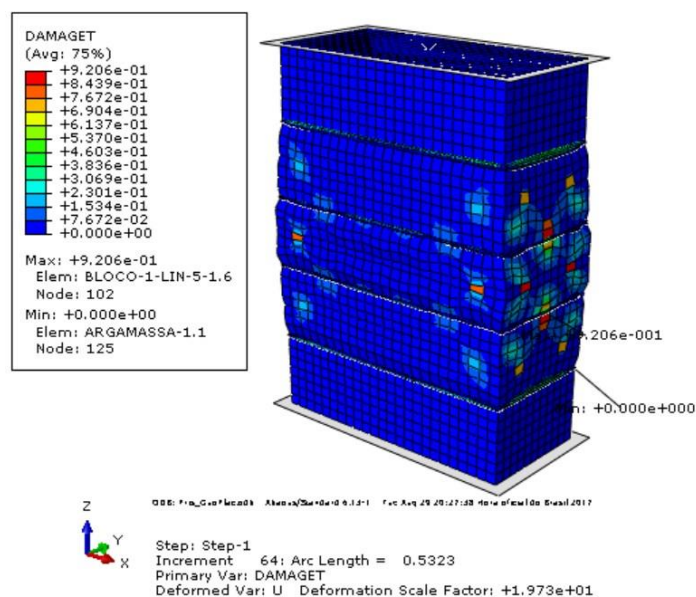


Figura 9. Resultados de dano à tração para o incremento 64 da análise

Para o mesmo incremento 64 da análise, o dano devido à compressão ainda é passível de variação e ainda estava se aproximando do valor unitário, contudo não há mais resistência da estrutura, pois considera-se que o colapso da mesma se deu por tração e, com isso, para esse incremento tem-se o valor máximo de resistência à compressão (Fig. 10).

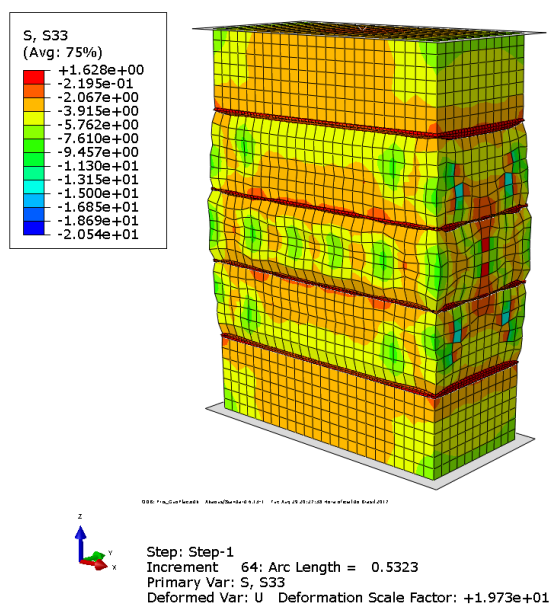


Figura 10. Resultados de resistência à compressão do prisma

Drougkas et al. (2015) analisaram numericamente cinquenta casos de modelos experimentais de prismas de alvenaria, dentre os quais estão os de McNary e Adams (1985). Esses autores utilizaram a micro-modelagem tridimensional, cujos materiais são modelados por um modelo de plasticidade dependente da pressão em compressão e um modelo de

fissuração distribuída em tração, combinados organicamente em um modelo não-linear de deformação total com descarregamento secante.

O dano causado por fissuração por tração é modelado usando um modelo de fissuração rotativo, onde as relações bloco-argamassa são avaliadas de acordo com as direções principais do vetor deformação, ou seja, a direção das fissuras irá mudar de acordo com a direção da deformação principal. O comportamento no cisalhamento é governado pela relação tensão-deformação de cisalhamento e o monitoramento da perda de rigidez do material é governado por seis variáveis internas de dano.

As análises foram realizadas no software de elementos finitos DIANA. Elementos de interface quadrilaterais de oito nós e altura nula são utilizados na ligação entre o bloco e a argamassa. Os autores utilizaram o esquema de integração Newton-Cotes para esses elementos e o método de Newton-Raphson modificado para a solução do problema não linear.

Por meio da utilização das formulações analíticas encontradas na CEN:EN 1996-1-1:2005, pode-se estimar também o valor da resistência à compressão de prismas e, com isso, obter mais informações para validação do modelo numérico. Nesse caso, considerando que a alvenaria é feita com argamassa para uso geral e argamassa leve, a resistência à compressão pode ser calculada por:

$$f_k = k \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3}. \quad (15)$$

Em que, f_k é a resistência característica à compressão da alvenaria, f_b é a resistência à compressão do bloco, f_m é a resistência à compressão da argamassa e k é o parâmetro que varia com o tipo de argamassa e de bloco (Tab. 3.3, CEN:EN 1996-1-1:2005) que, neste trabalho, admite-se como sendo igual a 0,60.

A Tabela 2 mostra os resultados obtidos nos ensaios experimentais de McNary e Adams (1985), bem como os resultados obtidos numericamente neste trabalho, além dos também obtidos numericamente por Drougkas et al. (2015) e, por último, os resultados obtidos analiticamente pela norma CEN:EN 1996-1-1:2005.

Tabela 2. Resultados de resistência à compressão (MPa) do prisma

$f_{c,exp}$	$f_{c,análítico}$	$f_{c,num}$ (Drougkas et al., 2015)	$f_{c,num}$
19,7	14,9	19,44	20,54
Erro (%)	-24,4	-1,32	4,26

Verifica-se que o valor de resistência obtido por esta análise numérica está bem próximo do valor resultante do ensaio, com um erro aproximado de 4,26 %, o que é aceitável. Pode-se afirmar com relação ao valor teórico da CEN:EN 1996-1-1:2005, que este subestima o valor da resistência à compressão do prisma, tornando-se muito conservadora na definição desta importante propriedade da alvenaria estrutural e é parâmetro primordial no dimensionamento

da mesma. A curva tensão-deformação do prisma é mostrada na Fig.11, onde observa-se que a rigidez inicial do prisma concorda com a obtida por McNary e Adams (1985).

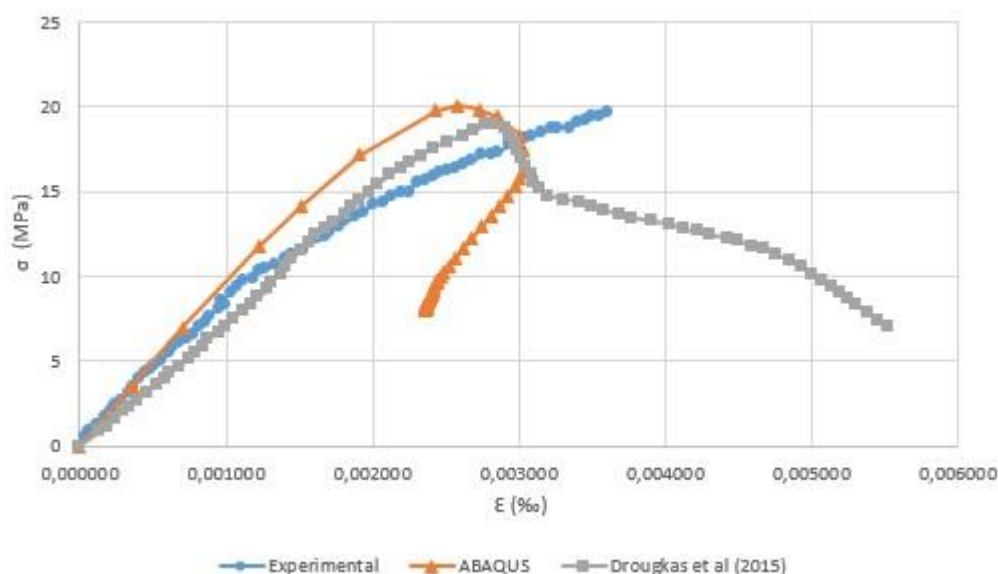


Figura 11. Curva tensão-deformação do prisma de alvenaria

Por meio do gráfico (Fig. 11), pode-se estimar ainda, os valores para os módulos de elasticidade dos prismas analisados nesta pesquisa. Para isso, tomou-se em cada curva obtida, um parâmetro de deformação de aproximadamente 0,004 % e a sua respectiva ordenada de tensão, cujos resultados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados para os Módulos de Elasticidade (MPa) dos prismas

$E_{c,exp}$	$E_{c,num}$ (Drougkas et al., 2015)	$E_{c,num}$
9888,58	6857,21	9855,25
Erro (%)	31 %	0,34 %

Com relação ao Módulo de Elasticidade, pode-se comprovar também, que o modelo apresentou um comportamento elástico inicial bastante aproximado do modelo experimental, diferentemente do que foi observado para o modelo numérico desenvolvido por Drougkas et al. (2015). No artigo, os referidos autores obtêm um valor de 6456 MPa considerando três elementos de interface e 12221 MPa para seis elementos. Ambos divergindo do valor experimental.

6 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi simular numericamente, da forma mais real possível, um prisma de alvenaria estrutural submetido à esforços de compressão uniaxial por meio do método dos elementos finitos. O intuito é validar o modelo numérico e obter a resistência à compressão do prisma e o seu comportamento.

O modelo de dano plástico (CDP) representa de forma adequada os componentes da alvenaria estrutural, cujo comportamento é não linear. Apesar da interface entre bloco e argamassa não permitir que haja deslocamentos relativos, foi possível se aproximar o comportamento do prisma. O modelo de dano foi capaz de capturar a perda ou ruptura da estrutura, que se deu por tração no bloco, ocasionada principalmente pelo esmagamento da argamassa. E isto é realmente o que se tem observado nos ensaios experimentais feitos em diversas pesquisas. Pode-se concluir que o modelo numérico foi capaz de representar de forma adequada o modelo experimental do prisma, em relação ao valor da sua resistência à compressão e também com o módulo de elasticidade. Portanto, pode ser utilizado em análises futuras de prismas ensaiados por Oliveira (2016).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela FUNCAP para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bertolesi, E.; Milani, G.; Lourenço, P. B., 2016. Implementation and validation of a total displacement non-linear homogenization approach for in-plane loaded masonry. *Computers and Structures*, v. 176, pp. 13-33.
- Bolhassani, M.; Hamid, A. A.; Lau, A. C. W.; Moona, F., 2015. Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages. *Construction and Building Materials* v. 83, pp. 159-173.
- Cardoso, H. S., 2014. *Estudo Teórico-Experimental de Parafusos Utilizados como Dispositivos de Transferência de Carga em Pilares Misto Tubulares Preenchidos com Concreto*. Dissertação de Mestrado, Escola de engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- CEN. *Eurocode 6: Rules for reinforced and unreinforced masonry*. EN 1996-1-1:2005, Brussels, Belgium, 2005.
- CEN. *Eurocode 6: Design of Masonry Structures*. EN 1996-1:2006, Brussels, Belgium, 2006.
- Cheema, T. S.; Klinger, R. E., 1986. Compressive strength of concrete masonry prism. *American Concrete Institute Journal-ACI Structural Journal*, v. 83, n. 1, pp. 88-87.
- TNO. DIANA user's manual. Delft: TNO DIANA BV; 2012.
- Drougkas, A.; Roca, P.; Molins, C., 2015. Numerical prediction of the behavior, strength and elasticity of masonry in compression. *Engineering Structures*, v. 90, pp. 15-28.
- Guo, Z., 2014. *Principles of Reinforced Concrete*. 1ª Ed., Oxford, Elsevier. 587 f.

- Gomes, I. R., 2001. *Simulação numérica do ensaio de compressão de prismas de alvenaria pelo método dos elementos finitos com comportamento de interface*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Kmiecik, P.; Kaminski, M., 2011. Modelling of Reinforced Concrete Structures Degradation Taken Into Consideration. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. XI, n. 3, pp. 623-636.
- Lubliner, J. et al., 1989. A plastic-damage model for concrete. *Solids and Structures*, v. 25, n. 3, pp. 299-326.
- Mcnary W. S.; Abrams D. P., 1985. Mechanics of masonry in compression. *J. Struct. Eng.*, v. 111, n. 4, pp. 857-870.
- Mata, R. C., 2006. *Influência do padrão de argamassamento na resistência à compressão de prismas e mini paredes de alvenaria estrutural de blocos de concreto*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Niero Jr., A., 2014. *Análise teórica e experimental de vigas em alvenaria estrutural submetidas à flexão simples*. Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Oliveira, A. H. L. B., 2016. *Evolução da resistência à compressão de prismas de blocos de concreto: análise experimental e modelagem matemática*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Prudêncio Jr, L. R., 1986. *Resistência à compressão da alvenaria e correlação entre resistência de unidades, prismas e paredes*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Riddington, J. R.; Naom, N. F., 1994. Finite element prediction of masonry compressive strength. *Computers & Structures*, v. 52, n. 1, pp. 113-119.
- Santos, C. F. R., et al., 2017. Avaliação numérico-experimental de prismas de alvenaria estrutural pelo método dos elementos finitos. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 2, pp. 477-508.
- Simulia, 2012. *Abaqus 6.12-Analysis User's Manual*. Dessault Systems, USA.
- Zahra, T.; Dhanasekar, M., 2016. A generalized damage model for masonry under compression. *International Journal of Damage Mechanics*, v. 25, n. 5, pp. 629–660.
- Zucchini, A.; Lourenco, P.B., 2007. Mechanics of masonry in compression: Results from a homogenization approach. *Computers and Structures*, v. 85, pp. 193–204.